

УДК 524.3

Заметки о частотах появления и энергетике звездных вспышек солнечного типа

Р.Е. Гершберг

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
gershber@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 13 марта 2015 г.

Аннотация. На основе результатов наземной фотометрии 30-летней давности и недавнего космического эксперимента “Кеплер” рассмотрены частоты появления и энергетика звездных вспышек солнечного типа. Получен вывод о том, что частоты таких вспышек пропорциональны размеру поверхности звезды, а оценки максимального излучения вспышек по наземной фотометрии и космическим наблюдениям практически совпадают.

NOTES ON FREQUENCIES OF OCCURRENCE AND ENERGETICS OF THE SOLAR-TYPE STELLAR FLARES, *by R.E. Gershberg*. On the basis of the 30-year ago ground-based photometry and recent Kepler space experiment there have been considered frequencies of occurrence and energetics of the solar-type stellar flares. It was concluded that frequencies of occurrence of such flares are proportional to sizes of stellar surfaces, and estimates of maximum flare radiation on the results of the ground-based photometry and space observations practically coincide.

Ключевые слова: вспыхивающие звезды, наземная и космическая фотометрия

1 Введение

Как известно, в 1958 году при выделении вспыхивающих звезд в отдельный тип переменных объектов в качестве его типичного представителя был выбран эмиссионный красный карлик M6e L 726-8 B = UV Кита. И красные карлики преобладали в списках таких переменных, когда их число составляло уже сотни – см. таблицу, в которой даны распределения по спектрам числа вспыхивающих звезд из крымских каталогов Гершберга и др. (1999) и (2011), обозначаемых в таблице как GKL99 и GTSh10 соответственно; во второй и третьей строках таблицы приведены характерные светимости и размеры таких звезд. По выборке из многих десятков тысяч M-звезд в рамках Слоановского проекта (SDSS), доля карликов с H α -эмиссией, которая является характеристикой вспыхивающих звезд, возрастает в диапазоне M0–M9 от 1 до 80 % (Вест и др., 2011).

После обнаружения радиоизлучения вспышек звезд типа UV Cet (Ловелл, 1964) и регистрации спектров таких вспышек с высоким временным разрешением (Гершберг и Чугайнов, 1966, 1967; Кункель, 1967) Гершберг и Пикельнер (1972) выдвинули идею о физической идентичности активности красных карликовых звезд и Солнца, а Маллэн (1975) привлек концепцию звездного магнетизма как основу этой активности. Сперва существенные различия глобальных параметров этих звезд и

Таблица

Спектры	F	G0–G9	K0–K3	K4–K8	M0–M3	M4–M8
$\langle L_*/L_\odot \rangle$	3	0.9	0.4	0.2	0.05	0.006
$\langle R_*/R_\odot \rangle$	1.2	1.0	0.8	0.7	0.5	0.2
Число звезд типа UV Cet в GKL99		10	19	25	146	212
Число звезд типа UV Cet в GTSh10	10	13	23	66	224	230

Солнца вызвали настороженное отношение к этой идее, но бурное развитие в 70–80-е годы всеволновой астрофизики обнаружило на этих звездах, в дополнение к уже известным тогда спорадическим оптическим и радиовспышкам и холодным фотосферным пятнам, практически все другие явления солнечной активности – активные области хромосферы, тепловое рентгеновское и нетепловое радиоизлучение корон, структуры типа протуберанцев, многолетние вариации излучения фотосферы и различных слоев атмосферы, аналогичные солнечным 11-летнему и вековому циклам активности, дифференциальное вращение на различных широтах. Поэтому в наши дни концепция единого рассмотрения активности Солнца и красных карликовых звезд является общепринятой.

Как показали многочисленные наблюдения, имеют место систематические различия средних спектральных типов и, следовательно, светимостей карликовых звезд, которым свойственны те или иные проявления этой активности: вспышки и спокойные хромосферы наиболее доступны для наблюдений и изучены у самых холодных M-звезд, среди запятненных карликов больше всего ранних M- и поздних K-звезд, многолетние циклы активности обнаружены в основном у ранних K- и поздних G-карликов. В этой закономерности четко проявляется наблюдательная селекция: вспышки и хромосферная эмиссия наиболее заметны на фоне слабого фотосферного излучения самых холодных звезд-карликов; для фотометрического обнаружения пятен, то есть для регистрации небольших деформаций кривой блеска звезды, уровень ее нормального блеска должен определяться с высокой точностью, для чего необходима более яркая фотосфера, и в излучении такой фотосферы будут теряться спорадические всплески яркости, обусловленные вспышками; наконец, многолетние циклы активности обнаруживаются главным образом с помощью спектрометрических наблюдений с высоким спектральным разрешением, которые возможны лишь при исследовании еще более ярких звезд. А рентгеновское и радиоизлучение корон, которым фотосферное излучение вообще не помеха, регистрируются от ранних F- до поздних L-карликов. Вопрос о том, до какой степени наблюдательная селекция маскирует реальную зависимость общего уровня различных проявлений активности звезд от их светимости, массы и возраста, требует в каждом случае специального анализа данных наблюдений. В этих заметках обсуждаются результаты наземных и космических фотометрических наблюдений вспыхивающих звезд, касающиеся частот появления и максимальных энергий вспышек.

2 Частоты появления наблюдаемых вспышек

Анализируя выполненные Моффеттом (1974) фотоэлектрические наблюдения 8 вспыхивающих звезд, Мирзоян (1981) обнаружил рост средней частоты регистрации вспышек с увеличением абсолютной звездной величины. При более подробном рассмотрении этого вопроса по более полным данным между этими средними частотами и абсолютными звездными величинами была обнаружена уверенная положительная корреляция

$$r(\lg \nu, M_B) = 0.81 \pm 0.1, \quad (1)$$

и на рис. 1 дано сопоставление этих величин и аналогичных величин, полученных из наблюдений вспыхивающих звезд в фиолетовых лучах (Гершберг, 1985). Уравнения прямых линейных регрессий имеют вид:

$$\begin{aligned} \lg \nu_U &= (0.14 \pm 0.04)M_U - 2.3 \pm 0.6, \\ \lg \nu_B &= (0.14 \pm 0.03)M_B - 2.8 \pm 0.4. \end{aligned} \quad (2)$$

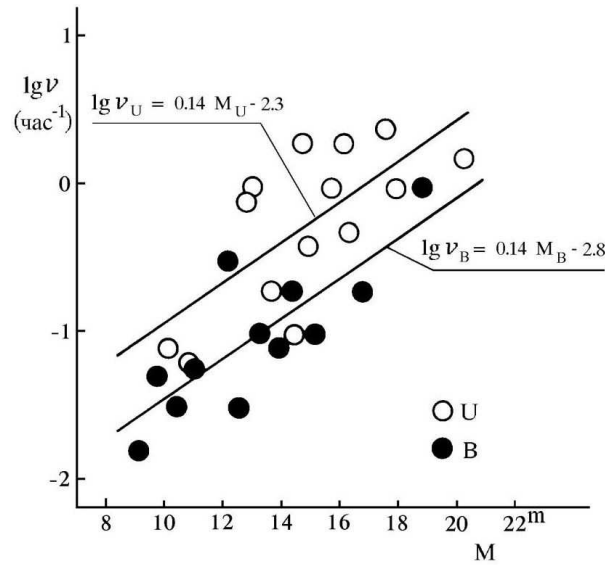


Рис. 1. Зависимости средней частоты появления регистрируемых вспышек от абсолютной светимости вспыхивающих звезд (Гершберг, 1985)

Так что статистическая зависимость средней частоты появления наблюдаемых на вспыхивающих звездах вспышек от абсолютной светимости может быть представлена соотношением:

$$\nu \propto L^{-0.35 \pm 0.09}. \quad (3)$$

Реальность наблюдаемой зависимости не вызывает сомнений, а ощутимый разброс точек на рис. 1 и соответствующие ему заметные вероятные погрешности численных коэффициентов в (2) могут быть обусловлены неоднородностью исходных данных наблюдений и физической неоднородностью – например, по возрасту рассматриваемых вспыхивающих звезд. Наконец, разброс точек на рис. 1 может быть обусловлен и тем обстоятельством, что вспыхивающие звезды часто являются компонентами двойных систем, которые могут содержать звезды разной яркости и разного уровня вспышечной активности, в результате чего должна появиться дисперсия в наблюдаемой зависимости $\lg \nu$ от M даже при существовании функциональной связи между этими параметрами для отдельных вспыхивающих звезд.

Уменьшение средней частоты появления регистрируемых вспышек с увеличением абсолютной светимости естественно связать с наблюдательной селекцией: на более ярких звездах выше порог обнаружения вспышек. Детальный статистический анализ наблюдаемых энергетических спектров вспышек показал, что при степенной форме этих спектров эффект наблюдательной селекции должен приводить к соотношению

$$\nu \propto L^{-0.96 \pm 0.13} \quad (4)$$

(Гершберг, 1985). Значимое различие между (3) и (4) означает, что при переходе от абсолютно слабых к абсолютно более ярким вспыхивающим звездам наблюдаемая частота вспышек убывает не так быстро, как это должно быть только из-за повышения порога обнаружения вспышек. По-видимому, этот эффект можно связать с увеличением площади поверхности более ярких звезд и существованием на них большего числа производящих вспышки активных областей. Действительно, если воспользоваться данными Петтерсена (1976, 1980) об абсолютных светимостях и размерах одиночных вспыхивающих звезд, то можно получить статистическое соотношение между этими величинами в виде:

$$L \propto R^{5.0 \pm 0.06}. \quad (5)$$

Тогда для множителя, на который различаются соотношения (3) и (4), получаем

$$L^{0.6 \pm 0.2} \propto R^{3.0 \pm 1.4} \propto 4\pi R^2 \cdot R^{1.0 \pm 1.4}. \quad (6)$$

Последний сомножитель в (6) ($R^{1.0 \pm 1.4}$) слишком не определен для каких-либо заключений об уровне “удельной” вспышечной активности с единицы поверхности вспыхивающей звезды; но влияние размера поверхности звезды на частоту регистрируемых вспышек представляется весьма вероятным.

Таким образом, зависимость средней частоты появления регистрируемых вспышек от абсолютной светимости звезды определяется как зависимостью порога обнаружения вспышек от светимости звезды, так и реальными различиями средних частот вспышек на звездах различной светимости, причем – вопреки широко распространенному мнению – истинная средняя частота появления вспышек на более ярких звездах выше. Отмеченное ошибочное мнение возникло в результате того, что обнаруженный наблюдениями факт более высокой частоты регистрируемых вспышек на звездах низкой светимости не был рассмотрен с точки зрения неизбежных эффектов селекции наблюдений. Отметим, наконец, что поскольку статистические исследования приводят к заключению, что и истинные частоты появления вспышек, и их максимальные светимости на более ярких вспыхивающих звездах выше, чем на менее ярких, то красные карликовые звезды являются наиболее выраженными носителями рассматриваемого типа активности не в силу того, что такая активность на этих объектах наиболее развита, а лишь благодаря тому, что она наиболее заметна на таких холодных звездах низкой светимости.

Здесь уместно напомнить недавний результат Балона (2015), который по наблюдениям на космическом аппарате “Кеплер” заключил, что примерно на 5 % К-, М-карликов регистрируются вспышки, тогда как около 1.5 % звезд каждого из G, F и A типов тоже обнаруживают вспышечную активность, причем звезды этих средних спектральных типов определенно вспыхивают сами, а не их слабые спутники, как ранее предполагалось. Иными словами, Балона не обнаружил резкого падения наблюдаемой вспышечной активности в диапазоне этих средних спектральных типов, которое можно было бы ожидать из-за довольно быстрого уменьшения толщины конвективной зоны и, следовательно, ослабления генерирующего магнитное поле динамо, а уменьшение от 5 % вспыхивающих К-, М-звезд до 1.5 % G-F-A активных звезд он отнес за счет падения контраста вспышек на фоне фотосфер с растущей температурой.

3 Вспышки максимальной энергии

Как известно, Маехара и др. (2012) проанализировали 365 сильных вспышек с энергией более 10^{33} эрг, зарегистрированных на 148 G-карликах при наблюдении 83000 звезд в эксперименте “Кеплер” в течение 120 суток в 2009 году. Типичная длительность таких вспышек составляла несколько часов, амплитуда – 0.1–1 % болометрической светимости звезды; при энергетических оценках предполагалось, что вспышки излучают как абсолютно черные тела при температуре 10000 К. Были получены оценки болометрической светимости таких вспышек от $9 \cdot 10^{29}$ до $4 \cdot 10^{32}$ эрг/с и их полной энергии от 10^{33} до 10^{36} эрг; неопределенность этих оценок достигает 60 %. Обнаруженная Маехарой и др. квазипериодичность свидетельствует о большем, чем на Солнце, числе запятненных областей. Максимальная энергия вспышек не коррелирует с периодами вращения, но мощные вспышки чаще происходят на звездах с быстрым вращением. Исходя из полученных оценок, Маехара и др. (2012) оценили, что столь мощные вспышки должны происходить на G-звезде раз в 350 лет. На медленно вращающихся звездах, как Солнце, такие вспышки должны происходить раз в 800 лет, а вспышки с энергией 10^{35} эрг – раз в 5000 лет. И если это верно, то Земля пережила уже миллион (!) таких грандиозных вспышек на Солнце без (?) видимого влияния на земную жизнь.

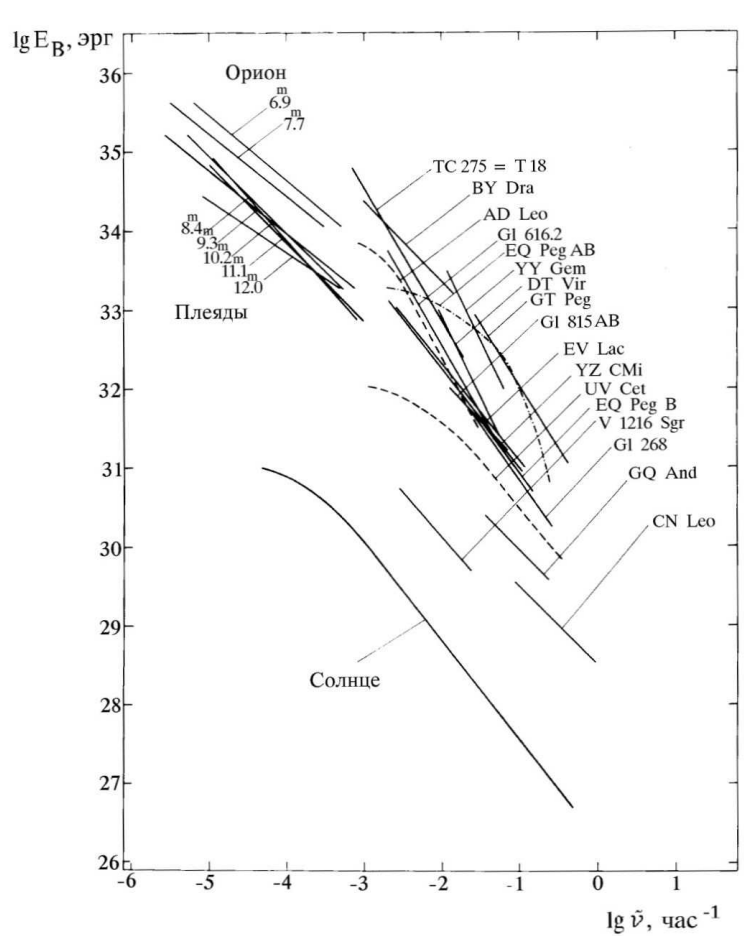


Рис. 2. Энергетические спектры вспышек звезд солнечной окрестности, звезд в скоплениях Плеяд и Ориона и солнечных вспышек (Гершберг и др., 1987)

Позднее Шибаяма и др. (2013) повторили исследования Маехары и др. (2012) на более полном материале, когда в результате 500-суточного мониторинга с «Кеплера» были зарегистрированы 1549 сверхвспышек на 279 G-звездах. Согласно этим данным, энергетический спектр сверхвспышек имеет степенную форму $dN/dE \propto E^{-\alpha}$ с $\alpha \sim 2$ и на таких медленно вращающихся звездах вспышки с энергией 10^{34} – 10^{35} эрг происходят раз в 800–5000 лет. Но на некоторых G-звездах за 500 суток были зарегистрированы 57 сверхвспышек; по-видимому, на них существуют огромные пятна и их группы. Среди звезд со вспышками с энергиями в диапазоне 10^{33} – 10^{36} эрг Вихманн и др. (2014) обнаружили очень молодые быстрые ротаторы.

Наконец, Канделареси и др. (2014) рассмотрели G-, K-, M-звезды общим числом 117661, наблюдавшиеся с «Кеплера», и на 380 из них обнаружили 1690 вспышек с энергией более 10^{34} эрг. Они использовали эти данные, чтобы выяснить влияние эффективной температуры и скорости вращения на частоты таких вспышек и их энергию, и нашли, что с ростом эффективной температуры частота появления сверхвспышек падает. Для медленно вращающихся звезд они обнаружили квадратичный рост частоты таких вспышек до некоторого критического предела, после которого она линейно убывает. Среди быстро вращающихся звезд их растущая со скоростью доля обнаружила более высокую запятненность, что приводит к большей частоте вспышек.

Сопоставим результаты космических исследований и наземной фотометрии.

В работе Гершберга и др. (1987) были представлены и проанализированы энергетические спектры вспышек индивидуальных звезд солнечной окрестности и групповые спектры вспышек звезд в скоплениях Плеяд и Ориона. Техника фотографических наблюдений одновременно нескольких сотен вспыхивающих звезд в скоплениях позволяет регистрировать очень редкие события, а принцип эргоичности – объединять вспышки близких по яркости вспыхивающих звезд скопления для вычисления групповых спектров вспышек (см. рис. 2). Для уменьшения разброса данных здесь по оси абсцисс отложены накопленные частоты.

Как следует из рис. 2, где энергетические спектры вспышек даны в двойном логарифмическом масштабе, максимальное значение интегральной энергии вспышек в полосе В – величина E_B – составляет не менее $3 \cdot 10^{35}$ эрг. Полагая, что суммарная оптическая энергия вспышек достаточно близка к их болометрической энергии, и используя соотношение между энергиями вспышек из упомянутой работы

$$E_{\text{опт}} = 4.2E_B, \quad (7)$$

получаем для максимального значения энергии величину 10^{36} эрг, практически совпадающую с оценками по Кеплеру.

Благодарю М.М. Кацову и М.А. Лившица за полезное обсуждение этих заметок.

Литература

- Балона (Balona L.A.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2015. V. 447. Issue 3. P. 271.
 Вест и др. (West A.A., Morgan D.P., Bochanski J.J., et al.) // *Astron. J.* 2011. V. 141. P. 97.
 Вихманн и др. (Wichmann R., Fuhrmeister B., Wolter U., Nagel E.) // arXive. 1406.0612v1. 2014.
 Гершберг Р.Е. // *Астрофизика.* 1985. Т. 22. С. 531.
 Гершберг Р.Е., Кацова М.М., Ловкая М.Н., Теребиж А.В., Шаховская Н.И. // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1999. V. 139. P. 555.
 Гершберг Р.Е., Могилевский Э.И., Обридко В.Н. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1987. Т. 3. № 5. С. 3.
 Гершберг Р.Е. и Пикельнер С.Б. // *Comments Astrophys. Space Phys.* 1972. V. 4. P. 113.
 Гершберг Р.Е., Теребиж А.В., Шляпников А.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2011. Т. 107. № 1. С. 18.
 Гершберг Р.Е. и Чугайнов П.Ф. // *Астрон. журн.* 1966. Т. 43. С. 1168.
 Гершберг Р.Е. и Чугайнов П.Ф. // *Астрон. журн.* 1967. Т. 44. С. 260.
 Канделареси и др. (Candelaresi S., Hillier A., Maehara H., Brandenburg A., Shibata K.) // *Astrophys. J.* 2014. V. 792. P. 97.
 Кункель (Kunkel W.) // *An optical study of stellar flares. Theses. University of Texas.* 1967.
 Ловелл (Lovell B.) // *Observatory.* 1964. V. 84. P. 191.
 Маехара и др. (Maehara H., Shibayama T., Notsu S., Notsu Y., et al.) // *Nature.* 2012. V. 485. P. 478.
 Маллэн (Mullan D.J.) // *Astron. Astrophys.* 1975. V. 40. P. 41.
 Мирзоян Л.В. // *Нестационарность и эволюция звезд. Изд-во АН Армянской ССР. Ереван.* 1981.
 Моффетт (Moffett T.J.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1974. V. 29. P. 1.
 Петтерсен (Pettersen B.R.) // *Theor. Astrophys. Inst. Report. Blindern-Oslo.* 1976. N. 46.
 Петтерсен (Pettersen B.R.) // *Astron. Astrophys.* 1980. V. 82. P. 53.
 Шибаяма и др. (Shibayama T., Maehara H., Notsu S., Notsu Y., et al.) // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2013. V. 209. P. 5.